

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření místní ztráty na hydraulické redukci – zúžení, rozšíření

Measurement of Local Losses for Hydraulic Reduction – Constriction,  
Extension

Student: Ondřej Havránek

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2012

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Havránek**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**  
Téma: **Měření místní ztráty na hydraulické redukci - zúžení, rozšíření.**  
**Measurement of Local Losses for Hydraulic Reduction - Constriction, Extension .**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teorie o proudění tekutin v potrubí, definování ztrátového součinitele obecně a pro předepsané hydraulické prvky.
2. Přehled měřidel tlaku a průtoku.
3. Popis zařízení pro měření hydraulických ztrát na redukci, měření tlakových ztrát a výpočet ztrátového součinitele.
4. Grafické zpracování výsledků a porovnání výsledků s literaturou.

Seznam doporučené odborné literatury:

DRÁBKOVÁ, SYLVA A KOL. *Mechanika tekutin*. OSTRAVA: VŠB-TU Ostrava, 2007. 248 S.  
(Elearningová učebnice). ISBN 978-80-248-1508-4.  
BOJKO, M. AJ. *Základy hydromechaniky a zásobování hasiv*. Ostrava: VŠB Ostrava 2007. 182 s., ISBN 80-86634-53-1  
MILLER, D., S. *Internal Flow System*, BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5  
KOZUBKOVÁ, Milada a kol. *Mechanika tekutin, návody pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 113 s. (Elektronická publikace na CD ROM)

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.  
vedoucí katedry

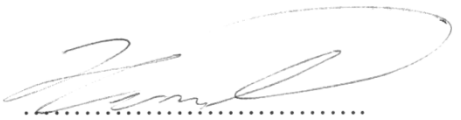


prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....18.5.2012.....

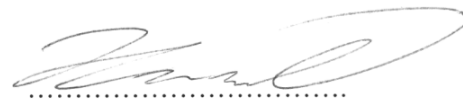


.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 18.5.2012.....



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Ondřej Havránek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Václava Jiřikovského 130/10,  
Ostrava-Dubina 700 30

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Havránek, O. *Měření místní ztráty na hydraulické redukci – zúžení, rozšíření : bakalářská práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 56 s. Vedoucí práce: Kozubková, M.

Náplní bakalářské práce je měření místních ztrát změny průřezu. Práce obsahuje části teoretickou a praktickou. V teoretické části je zpracována problematika tlakových ztrát na redukci, postup měření těchto ztrát a popis 2 měřících obvodů. V praktické části je provedeno vyhodnocení součinitelů místních ztrát na zadaných prvcích. V práci jsou výsledky měření porovnány s literaturou.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Havránek, O. *The Measurement of Local Losses for Hydraulic Reduction – Constriction, Extension : Bachelor Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2012, 56 p. Thesis head: Kozubková, M.

Goal of this bachelor work is the measurement of local losses for the reduction. Work contains both theoretical and practical part. In the theoretical part there is processed problematic of pressure losses of liquid on reduction, procedure of measurement of these losses and description of 2 measuring circuits. In the practical part there are made the evaluation measurement of local losses of Constriction and Extension. In this bachelor work the measurement results are compared with literature.

## Obsah

Seznam použitého značení.....	8
Úvod.....	9
1   Hydraulické ztráty .....	10
1.1   Třecí ztráty .....	10
1.2   Místní ztráty .....	12
1.3   Vznik místních ztráty ve změně průřezu.....	13
1.4   Definice ztrátového součinitele dle literatury .....	14
1.5   Odvození výpočtu pro provedená měření .....	16
1.6   Odvození výpočtu pro zúžení.....	16
1.7   Odvození výpočtu pro rozšíření .....	17
2   Měření tlaku.....	19
2.1   Tlak .....	19
2.2   Měřidla tlaku .....	19
3   Měření průtoku .....	23
3.1   Průtok .....	23
3.2   Měřidla průtoku.....	23
4   Měření.....	26
4.1   Měřicí obvod č. 1 .....	26
4.2   Postup měření pro obvod č. 1.....	28
4.3   Měřicí obvod č. 2 .....	29
4.4   Postup měření pro obvod č. 2.....	31
5   Vyhodnocení měření .....	33
5.1   Příklad výpočtu .....	33
5.2   Vyhodnocení měření 1. Obvodu .....	35
5.3   Vyhodnocení měření 2. Obvodu .....	39
6   Srovnání výsledků měření .....	41
6.1   Srovnání výsledků obvodů.....	41
6.2   Ovlivnění výsledků .....	41
6.3   Srovnání výsledků dle Simulink-Simhydraulics.....	43
6.4   Srovnání výsledků dle literatury Mechanika tekutin .....	44
6.5   Srovnání výsledků dle literatury Internal flow systems.....	45
6.6   Grafické vyhodnocení .....	46
7   Závěr.....	48
Použitá literatura .....	49

Seznam příloh .....	50
---------------------	----

## Seznam použitého značení

Značka	Název	Rozměr
$d_1$	průměr menšího potrubí	[m]
$d_2$	průměr většího potrubí	[m]
$e_z$	ztrátová energie	[J.kg <sup>-1</sup> ]
$h_c$	rozdíl výšek na cloně	[m]
$h_{měř}$	rozdíl výšek na u-trubici	[m]
$l_1$	délka potrubí světlosti $d_1$	[m]
$l_2$	délka potrubí potrubí světlosti $d_2$	[m]
$Q$	objemový průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Re$	Reynoldsovo číslo v potrubí světlosti $d_1$	[1]
$S_1$	průřez potrubí světlosti $d_1$	[m <sup>2</sup> ]
$S_2$	průřez potrubí světlosti $d_2$	[m <sup>2</sup> ]
$v_1$	rychlost kapaliny v potrubí světlosti $d_1$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$v_1$	rychlost kapaliny v potrubí světlosti $d_2$	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\lambda_1$	třecí součinitel pro potrubí světlosti $d_1$	[1]
$\lambda_2$	třecí součinitel pro potrubí světlosti $d_2$	[1]
$\xi_R$	ztrátový součinitel pro rozšíření z literatury	[1]
$\xi_Z$	ztrátový součinitel pro zúžení z literatury	[1]
$\xi_{r1b}$	ztrátový součinitel pro rozšíření z 1. obvodu měřený „blízko“	[1]
$\xi_{r1d}$	ztrátový součinitel pro rozšíření z 1. obvodu měřený „daleko“	[1]
$\xi_{r2b}$	ztrátový součinitel pro rozšíření z 2. obvodu měřený „blízko“	[1]
$\xi_{r2d}$	ztrátový součinitel pro rozšíření z 2. obvodu měřený „daleko“	[1]
$\xi_{z1b}$	ztrátový součinitel pro zúžení z 1. obvodu měřený „blízko“	[1]
$\xi_{z1d}$	ztrátový součinitel pro zúžení z 1. obvodu měřený „daleko“	[1]
$\xi_{z2b}$	ztrátový součinitel pro zúžení z 2. obvodu měřený „blízko“	[1]
$\xi_{z2d}$	ztrátový součinitel pro zúžení z 2. obvodu měřený „daleko“	[1]
$\Delta p_k$	tlaková difference vzniklá přeměnou kinetické energie	[Pa]
$\Delta p_m$	tlaková difference vzniklá místní ztrátou	[Pa]
$\Delta p_{měř}$	měřená tlaková difference	[Pa]
$\Delta p_{tř}$	tlaková difference vzniklá třecími ztrátami	[Pa]
$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]

Pozn.: Jednotky uvedených fyzikálních veličin jsou uvedeny jako základní. Případný jiný rozměr veličiny je v textu, či v tabulkách uveden.



## Úvod

Cílem této bakalářské práce je zpracování teorie o místních ztrátách a jejich měření, dále praktické zpracování postupu měření a výpočtu pro měření ztrátového součinitele na rozšíření a zúžení. Následné změřením uvedených prvků v laboratorním měření.

Naměřené hodnoty ztrátových součinitelů následně budou zpracovány početně i graficky a výsledné hodnoty budou porovnány s literaturou.

Použití správných ztrátových součinitelů je důležité z důvodu návrhu celkového tlakového spádu obvodu, při použití nesprávných součinitelů může dojít k předimenzování obvodu nebo naopak k nedostatečnému výkonu čerpadla. V extrémním případě může dojít ke stavu, kdy obvodem nebude protékat žádná kapalina.

V teoretické části jsou uvedeny základní poznatky o ztrátách v potrubních systémech. Jsou zde uvedeny poznatky o místních i třecích ztrátách. Třecí ztráty jsou zde zmíněny z důvodu ovlivnění výsledků měření právě těmito třecími ztrátami. Uvažováním těchto ztrát tuto chybu eliminuji při výpočtu.

Místní ztráty jsou zde uvedeny podrobněji nežli třecí ztráty. Konkrétně je zde podrobně rozebrána definice vzniku a výpočtu místní ztráty pro zúžení a rozšíření.

Pro tuto práci byly zvoleny dva rozdílné obvody. První obvod pracující při menších Reynoldsových číslech, druhý obvod pracující při dvojnásobných Reynoldsových číslech.

Pro měření jsem volil dva způsoby. První způsob byl měření „blízko“, kdy odběrná místa byla umístěná v blízkosti redukce a měření „daleko“, kdy odběrná místa byla umístěna ve větší vzdálenosti z důvodu eliminace případného neustáleného proudění kapaliny za redukcí.

Z Bernoulliho rovnice jsem odvodil vzorce pro výpočet ztrátového součinitele pro redukce, se zahrnutím vlivu změny kinetické energie a třecí ztráty.

Výsledky jsem zpracoval pomocí regresní funkce a vyhodnotil početně i graficky.

## 1 Hydraulické ztráty

Hydraulické odpory se uvažují při proudění skutečné kapaliny potrubím. Hydraulický odpor (ztrátu) definujeme, jako rozptyl energie. Tento rozptyl energie se projevuje jako degradace kinetické energie, tlaková ztráta a popřípadě snížení polohové energie.

Hydraulické odpory vznikají v důsledku viskozity proudící kapaliny, třením o stěny potrubí, vířením při změnách průřezu a také změnách směru proudění.

Z důvodu složitosti definování hydraulických ztrát je pro výpočet většiny případů použito polo-empirických metod. [1]

### Hydraulické ztráty dělíme

- **třecí ztráty**, jsou úměrné délce potrubí, vznikají především třením o stěny potrubí a důsledkem vnitřního tření
- **místní ztráty**, vznikají v místech, kde dochází k víření kapaliny. Především v důsledku změny rychlosti (průtočného průřezu), změnou směru rychlosti (zakřivení vedení), popřípadě kombinací změny rychlosti i směru proudění kapaliny (armatury).

#### 1.1 Třecí ztráty

Jak již název napovídá, jde o ztráty způsobené třením. Konkrétněji o ztráty třením o stěny potrubí (kanálu, hadice apod.) a vlivem vnitřního tření.

Velikost třecích ztrát je přímo úměrná délce vedení a tzv. třecímu součiniteli  $\lambda$ , který závisí na druhu kapaliny (viskozitě) a druhu proudění kapaliny ( $Re < 2\,320$  = laminární,  $Re > 2\,320$  = turbulentní).

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (1.1)$$

### Výpočet třecího součinitele pro laminární proudění

Laminární proudění je proudění, při kterém jsou proudnice kapaliny rovnoběžné a vzájemně se nemísí (viz obr. 1.1). Vyskytuje se při proudění pomalými rychlostmi.

- **Laminární proudění**  $Re < 2\,320$  (izotermické)

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1.2)$$

- **Laminární proudění**  $Re < 2\,320$  (neizotermické)

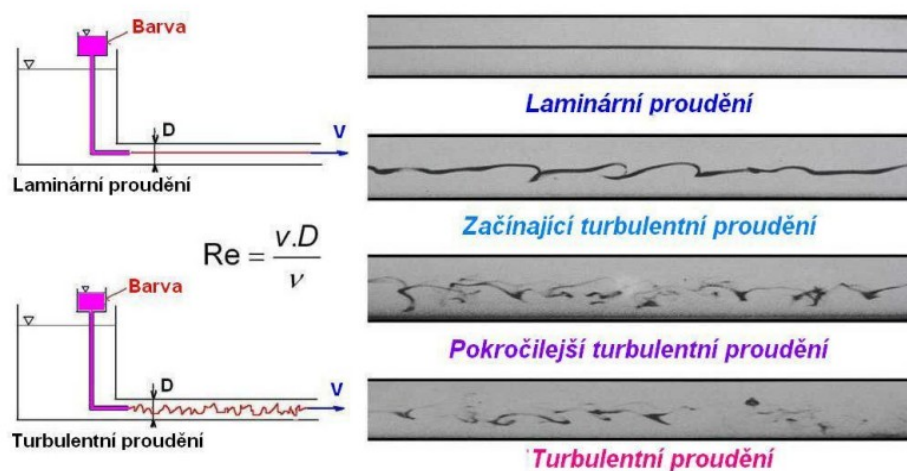
$$\lambda = \frac{75}{Re} \quad (1.3)$$

### Výpočet třecího součinitele pro turbulentní proudění:

Turbulentní proudění je proudění, při kterém se proudnice kapaliny nepravidelně a chaoticky promíchávají (viz obr. 1.1). Vyskytuje se při proudění vysokými rychlostmi.

- **Turbulentní proudění**  $Re > 2\,320$  např. dle Blasiusa (použito při výpočtu)

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (1.4)$$



Obr. 1.1 Reynoldsův pokus [4]

**Třecí ztráty lze definovat:** např. pomocí ztrátové energie:

$$e_z = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.5)$$

## 1.2 Místní ztráty

V obvodech vedle třecích ztrát v potrubí vznikají i místní odpory (ztráty) v důsledku zařazení různých tvarových prvků (kolena, rozšíření, zúžení, armatury, manometry, chladiče atd.).

Použité tvarové prvky způsobují změnu směru a rychlosti proudění. Tyto změny jsou způsobeny různými tvary prvků, popřípadě změnou průtočného průřezu. V těchto místech dochází k zavírání a následnému rozptylu energie.

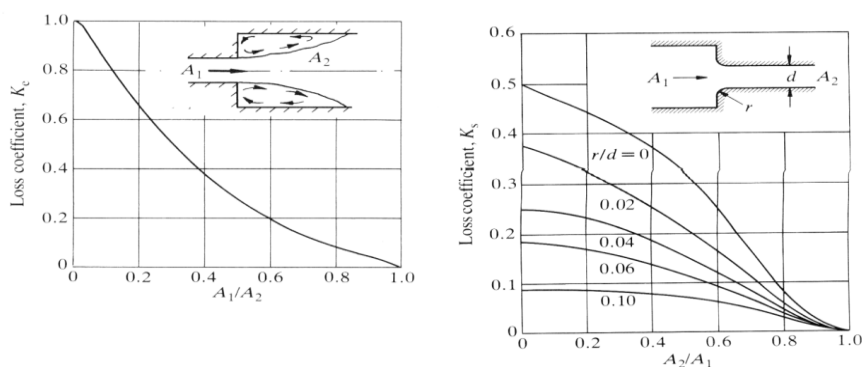
K rozptylu energie dochází v místě umístění tvarového prvku. Odtud plyne název „místní ztráty“. [1]

### Ztrátový součinitel

Místní odpory jsou definovány ztrátovým součinitelem ( $\xi$ ). Ztrátový součinitel místní ztráty závisí především na konstrukci tvarových prvků, na režimu proudění (Reynoldsové číslo) a na tvaru rychlostního profilu. [1]

Hodnoty ztrátových součinitelů se určují především empiricky. Lze je odečíst z katalogů příslušných prvků. Např. z grafů pro dané prvky (např. obr. 1.2).

Následně se budu v práci zaměřovat na porovnání ztrátových součinitelů redukci (rozšíření, zúžení).



Obr. 1.2 Grafy pro ztrátové součinitele [8]

**Místní ztráty lze definovat:** např. pomocí ztrátové energie:

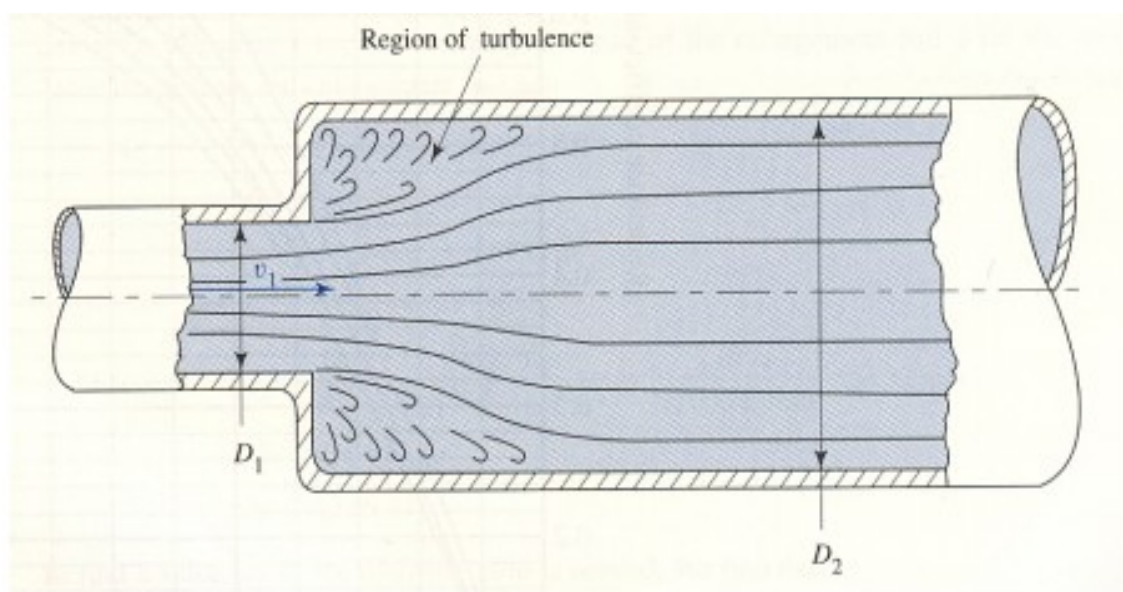
$$e_z = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \quad (1.6)$$

### 1.3 Vznik místních ztráty ve změně průřezu

#### Náhle rozšíření

U náhlého rozšíření průřezu se odtrhne proud kapaliny od stěny potrubí. Tento jev zapříčiní vytvoření vírů (viz obr. 1.3). V úseku za náhlým rozšířením dojde znovu k rozšíření proudu po celém průřezu a víry zaniknou.

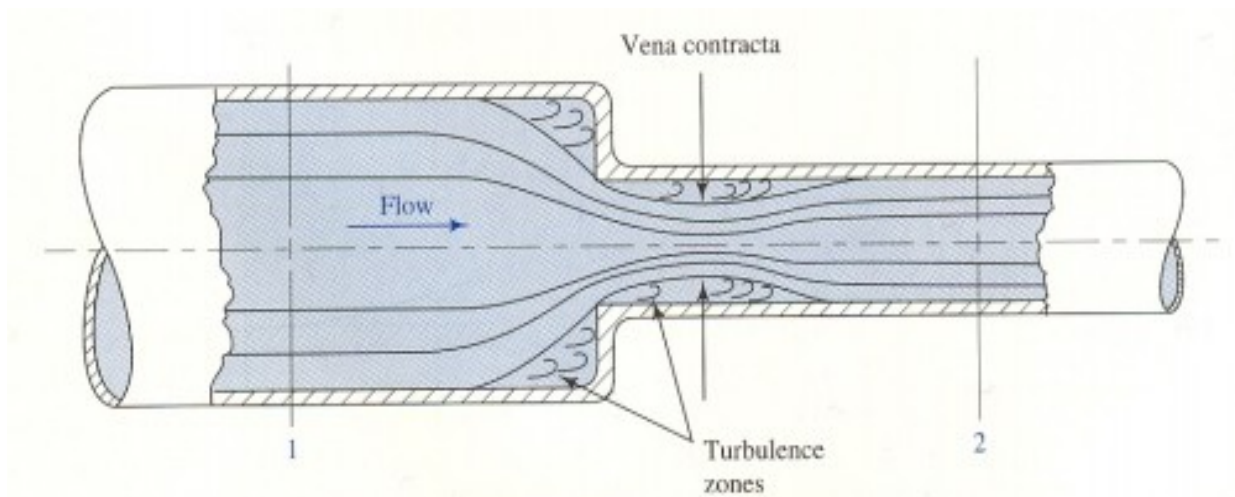
Změnou rychlosti dojde ke změně tlaku, kde při snížení střední rychlosti vlivem většího průřezu stoupne tlak.



Obr. 1.3 Průběh proudění kapaliny v náhlém rozšíření [2]

#### Náhle zúžení

Při náhlém zúžení dochází k urychlení kapaliny. Kapalina má větší setrvačnost a nemůže kopírovat tvar stěn potrubí, dochází k odtržení proudu kapaliny od stěn potrubí a důsledkem je tvorba vířivých oblastí (viz obr. 1.4).



Obr. 1.4 Průběh proudění kapaliny v náhlém zúžení [2]

## 1.4 Definice ztrátového součinitele dle literatury

### Simulink-Simhydraulics

Simulink je nadstavba Matlabu pro simulaci a modelování dynamických systémů. Využívá algoritmů Matlabu k simulaci různých situací, které vytvořil uživatel.

Simhydraulics je nadstavba pro simulaci hydraulických systémů a obvodů. Z této nadstavby a příslušné příručky se budu zabývat definicí ztrátového součinitele místní ztráty pro redukci.

V nadstavbě Simhydraulics je definován ztrátový součinitel pomocí 2 vzorců. První uvedený je pro rozšíření druhý pro zúžení. Tyto vztahy v příručce nejsou nijak odvozeny. [9]

#### ○ Rozšíření

$$K_{SE} = K_{COR} \cdot \left(1 - \frac{A_S}{A_L}\right)^2 \quad (1.7)$$

#### ○ Zúžení

$$K_{SC} = K_{COR} \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_S}{A_L}\right)^{0,75} \quad (1.8)$$

**Kde:**

$K_{SE}$	je ztrátový součinitel pro rozšíření	[1]
$K_{SC}$	je ztrátový součinitel pro zúžení	[1]
$K_{COR}$	je opravný součinitel při použití polo-empirických vztahů	[1]
$A_S$	je průřez trubky menší světlosti	[m <sup>2</sup> ]
$A_L$	je průřez trubky větší světlosti	[m <sup>2</sup> ]

*Budeme uvažovat čistě empirické vzorce tedy  $K_{COR}=1$ . Výsledné součinitele jsou vztaženy pro rychlost v potrubí o světlosti  $d_1$  tedy pro rychlost  $v_1$ .*

## **Mechanika tekutin**

V této literatuře je definován ztrátový součinitel opět vztahem. Tento vztah je odvozen ze změny hybnosti kapaliny. V této práci budu definovat měřený ztrátový součinitel pro rychlost v průřezu o menší světlosti tedy potrubí o průměru  $d_1$ .

Z tohoto důvodu používám k porovnání vzorce pro rozšíření definované pro vtokovou rychlost a zúžení pro odtokovou rychlost. [7]

### **○ Rozšíření**

$$\xi_R = \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)^2 \quad (1.9)$$

### **○ Zúžení**

$$\xi_Z = 1 - \frac{S_2}{S_1} \quad (1.10)$$

## **Internal flow systems**

V této literatuře je ztrátový součinitel vyjádřen pomocí grafu (viz obr. 1.2) definovaného dle poměrů průtočných průřezů.

V obou případech jde o poměr menšího průřezu k většímu ( $S_1/S_2$ ) a ztrátový součinitel je definován pro rychlost v potrubí menší světlosti. Při zúžení jde o rychlost výstupní při rozšíření o rychlost vstupní. Tyto závislosti jsou odvozeny pro Reynoldsova čísla větší než 500 000. [8]

## 1.5 Odvození výpočtu pro provedená měření

Při změně průřezu v potrubí dochází ke změně rychlosti kapaliny vlivem zmenšení nebo naopak zvětšení průřezu. Rychlosti můžeme odvodit z rovnice kontinuity.

Při zvýšení rychlosti kapaliny dochází k přeměně značného množství tlakové energie v kinetickou energii, což nám značně ovlivňuje naměřenou tlakovou diferenci.

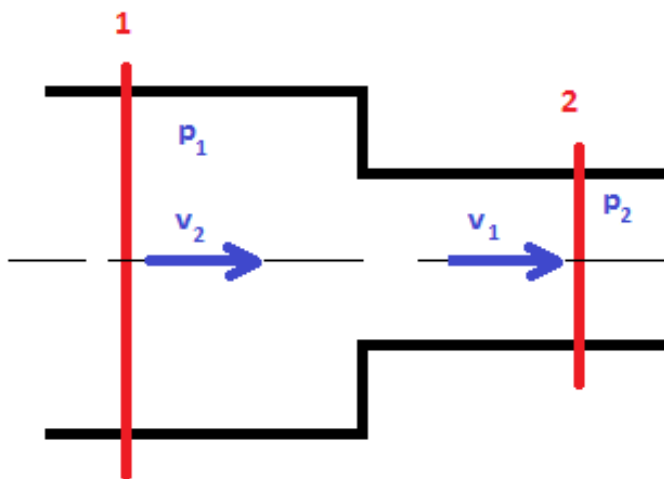
Naopak při rozšíření průřezu dochází k přeměně kinetické energie na tlakovou, což nám zkresluje měřenou tlakovou diferenci zmenšením měřené difference.

Z tohoto důvodu musíme brát v úvahu tyto změny při měření redukci. K naměřené hodnotě tlakové difference při měření rozšíření musíme přičíst hodnotu změny kinetické energie. Naopak pro zúžení hodnotu změny kinetické energie musíme odečíst.

Výsledek je do značné míry ovlivněn třecími ztráty. I na malém úseku může docházet v poměru k místní ztrátě ke značné třecí ztrátě. Proto i tuto hodnotu v obou případech musíme odečíst od hodnoty naměřené difference, protože třecí ztráta nám zvětšuje měřenou diferenci.

Odvození je provedeno níže.

## 1.6 Odvození výpočtu pro zúžení



Obr. 1.5 Zúžení

Odvození vzorce pro vyhodnocení místní ztráty jsem provedl z Bernoulliho rovnice, kterou jsem sestavil pro 2 průřezy (viz Obr. 1.5).



**Bernoulliho rovnice pro zúžení:**

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + e_z \quad (1.11)$$

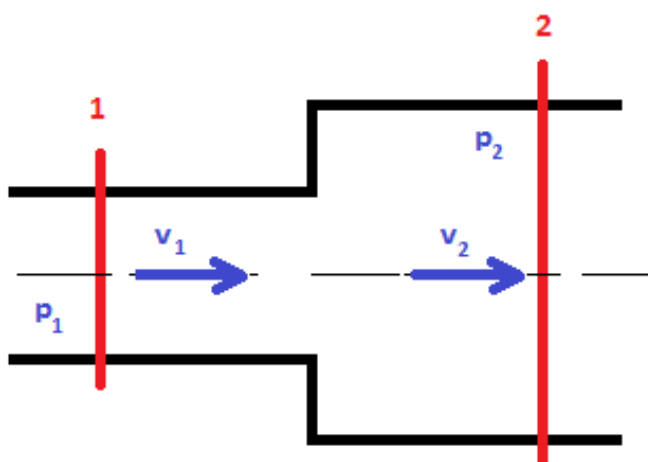
po úpravě dostaneme:

$$p_1 + \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho = p_2 + \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho + (\Delta p_{tř} + \Delta p_m) \quad (1.12)$$

**Konečný vztah:**

$$\Delta p_m = (p_1 - p_2) + \left( \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho - \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho \right) - \Delta p_{tř} \quad (1.13)$$

## 1.7 Odvození výpočtu pro rozšíření



Obr. 1.6 Rozšíření

Odvození pro rozšíření jsem opět provedl z Bernoulliho rovnice, kterou jsem sestavil pro 2 průřezy (viz obr. 1.6).

**Bernoulliho rovnice pro rozšíření:**

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + e_z \quad (1.14)$$

po úpravě dostaneme:

$$p_1 + \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho = p_2 + \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho + (\Delta p_{\text{tr}} + \Delta p_m) \quad (1.15)$$

**Konečný vztah:**

$$\Delta p_m = (p_1 - p_2) + \left( \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho - \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho \right) - \Delta p_{\text{tr}} \quad (1.16)$$

## 2 Měření tlaku

### 2.1 Tlak

Tlak je definován jako poměr  $dF/dS$ , jednotkou tlaku je Pascal [Pa]. Tlak na zemském povrchu nazýváme barometrický tlak.

Za podmínky měření tlaku od nulové hodnoty, mluvíme o tlacích absolutních. V případě, když je tlak absolutní vyšší než barometrický, nazýváme rozdíl přetlakem, podtlakem jej nazýváme v opačném případě. Absolutní tlaky nižší než je tlak barometrický nazýváme vakuum.

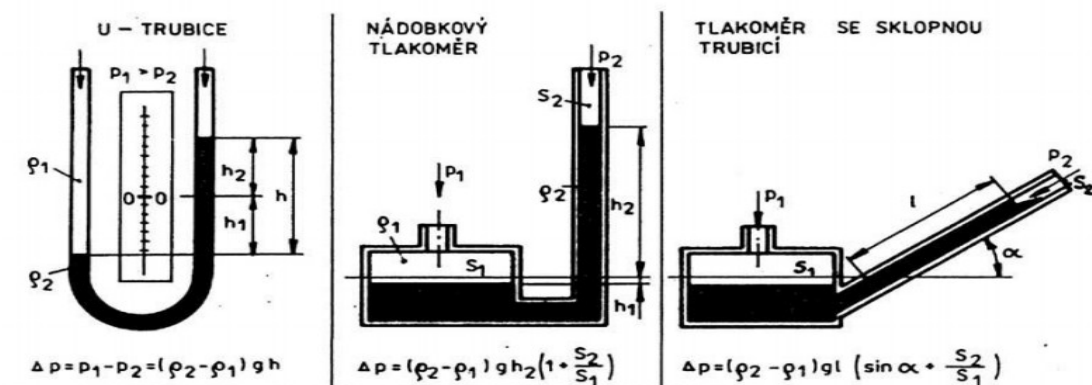
K měření statických úloh v laboratořích i provozech používáme nejčastěji tlakoměry kapalinové, pístové a deformační.

### 2.2 Měřidla tlaku

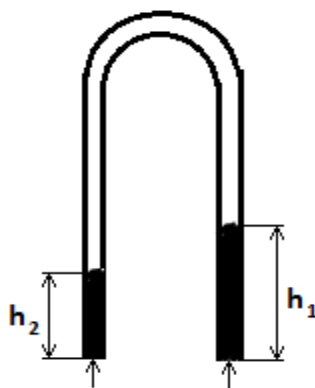
#### Tlakoměry trubicové

Nejpoužívanější pro měření malých tlaků z důvodu jednoduchosti a přesnosti. Změna tlaku nebo tlakové difference se projeví na změně výšky hladiny tlakoměrné kapaliny.

Pro měření v 1. obvodu bylo použito obrácené U-trubice (obr. 2.2) z důvodu jednoduchosti, malé ceny a dostatečné přesnosti, kde tlakovou diferencí vypočteme pomocí rovnice 2.1. [6]



Obr. 2.1 Trubicové tlakoměry [6]



Obr. 2.2 Obrácená U-trubice

$$\Delta p_{\text{měř}} = \rho \cdot g \cdot h_1 - \rho \cdot g \cdot h_2 = \rho \cdot g \cdot \Delta h \quad (2.1)$$

### Deformační tlakoměry s elastickým členem

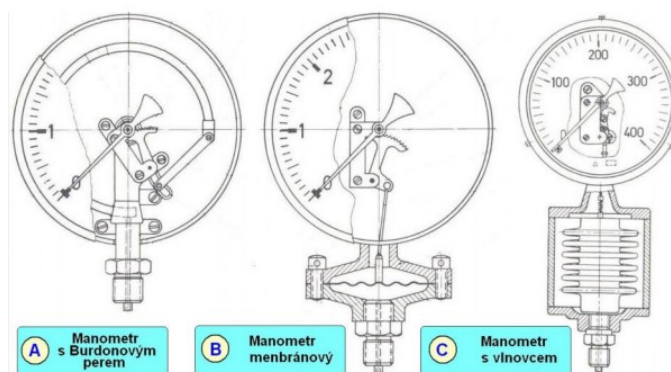
Měření tlaku je u těchto typů řešeno za pomoci měření deformace. Elastické členy jsou deformovány v mezích pružných deformací, kdy po odlehčení se namáhaný člen vrací do původní polohy.

Nejpoužívanější elastickým tlakoměrem je tlakoměr s Bourdonovou trubicí, jehož konstrukce je nejlépe zpracována. Trubice je eliptického průřezu se střednicí tvaru oblouku. Trubice může také být stočená do spirály nebo šroubovice. Trubice je uchycena na tlakovou přípojku a druhý konec se volně deformuje podle velikosti přivedeného tlaku. Vychýlení volného konce trubice je mechanicky převedeno na stupnici, kde odečteme velikost měřeného tlaku.

Dalším elastickým členem je membrána, ve většině případů má kruhový tvar. Uchycena mezi 2 příruby a z jedné strany zatížena měřeným tlakem. Deformace membrány se převádí mechanicky na stupnici, z níž odečteme měřený tlak. Lze použít membrány hladké, prohnuté nebo zvlněné pro snížení tuhosti se zachováním pevnosti.

Pro měření malých tlaků můžeme použít manometrů s vlnovcem, kde dosáhneme velké deformace při malém tlaku. [6]

Tohoto typu diferenčního manometru bylo použito pro měření v 2. obvodu s indukčním snímáním deformace membrány (viz Obr. 4.7).

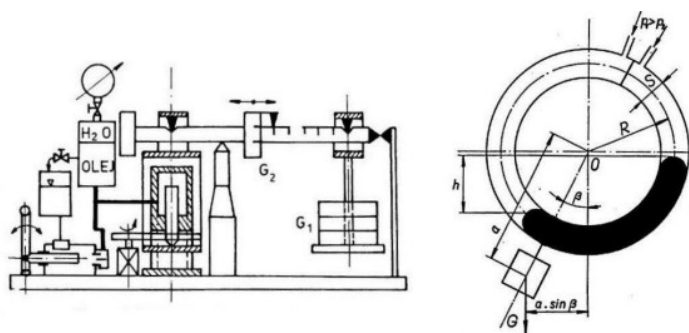


Obr. 2.3 Deformační manometry [6]

### Tlakoměry se silovým účinkem

Fungují na principu převedení měření tlaku na měření síly, kde účinek mechanické síly je roven účinku tlakové síly.

Nejznámější jsou tlakoměry pístové a prstencové. Pístový typ se používá především ke kalibraci ostatních manometrů. [6]



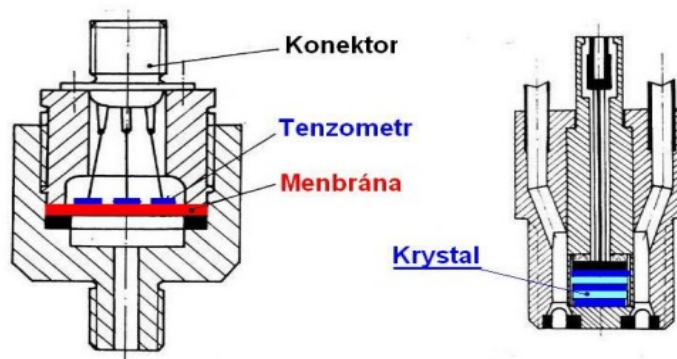
Obr. 2.4 Tlakoměry se silovým účinkem [6]

### Tenzometrické snímače tlaku

Používají se pro měření závislosti tlaku na čase například při hydraulickém rázu. Pro tyto dynamické měření je nutno použít tlakových snímačů s rychlou odezvou, aniž by došlo ke zkreslení amplitudového nebo fázového zkreslení. Pro tato měření nejlépe vyhovují elektrické snímače, např. kapacitní, tenzometrické, kapacitní a piezoelektrické. Nejpoužívanější jsou tenzometrické a piezoelektrické.

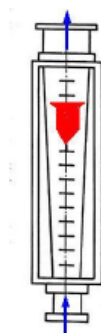
Tenzometrické snímače fungují na principu převodu tlakové změny na deformaci pružného členu a tuto deformaci následně pomocí změny odporu na elektrický signál. Nevýhodou těchto snímačů je možnost ovlivnění přesnosti měření teplotou okolí.

Piezoelektrické snímače fungují na principu mechanického namáhání krystalu, následkem namáhání je vznik elektrického náboje. Velikost náboje je přímo úměrná velikosti namáhání. Nejčastěji se používá krystal křemene. Výhodou jsou malé rozměry, malý škodlivý prostor a rychlá odezva. Nevýhodou je nutné zesílení signálu a cejchování. [6]



Obr. 2.5 Tenzometrické snímače tlaku [6]

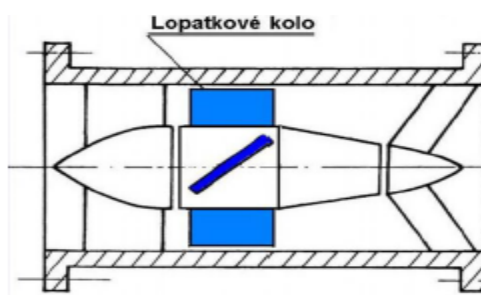




Obr. 3.2 Plovákový průtokoměr [6]

### Rychlostní průtokoměry

Základním prvkem je lopatkové kolo, kde sledujeme jeho otáčky, a do vztahu pro určený průtokoměr dosadíme otáčky a dostaneme hodnotu sledovaného průtoku. [6]



Obr. 3.3 Rychlostní průtokoměr [6]

### Vírové průtokoměry

Principem funkce je vznik Kármánových vírů v důsledku obtékání tělesa vloženého napříč průtočného průřezu. [6]

### Ultrazvukové průtokoměry

Využívají principu změny rychlosti šíření ultrazvukových vln ve směru i protisměru v průřezu proudění kapalin. [6]

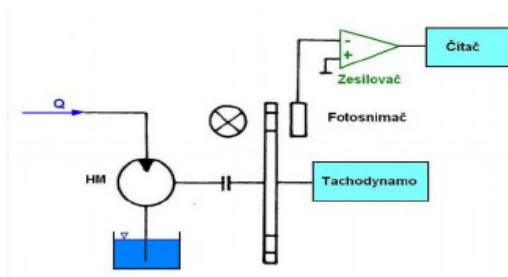


## Anemometry

Fungují na principu ochlazování rozžhaveného tělesa proudící kapalinou. Velikost průtoku je určena velikostí ochlazení tělesa. [6]

## Měření pomocí nezatíženého hydromotoru

Kapalina protéká nezatíženým hydromotorem. Sledujeme otáčky tohoto hydromotoru a z nich lze vypočítat průtok. Často používaný způsob měření. [6]



Obr. 3.4 Měření pomocí nezatíženého hydromotoru [6]

## Indukční průtokoměr

Pro elektricky vodivé kapaliny. Na principu Faradayova zákona, pohybující se vodič nahrazuje vodivá kapalina. Snímáme indukované napětí elektrodami. [6]

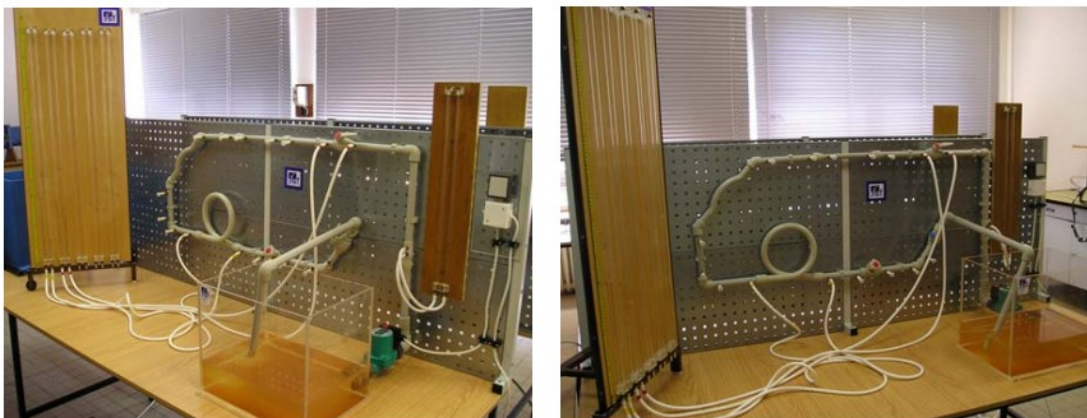
Tento typ byl použit pro měření v 2. obvodu (viz Obr. 4.6).

## 4 Měření

### 4.1 Měřicí obvod č. 1

#### Úvod

Měřicí obvod (obr. 3.1) je sestaven z prvků, které slouží například k rozvodům vody v rodinném domě. Na těchto prvcích dochází k úbytkům energie v důsledku místních ztrát energie. Prvky jsou vybaveny odběrnými místy pro zjištění tlakové difference na obrácených U-trubicích připojených na těchto odběrných místech. [5]

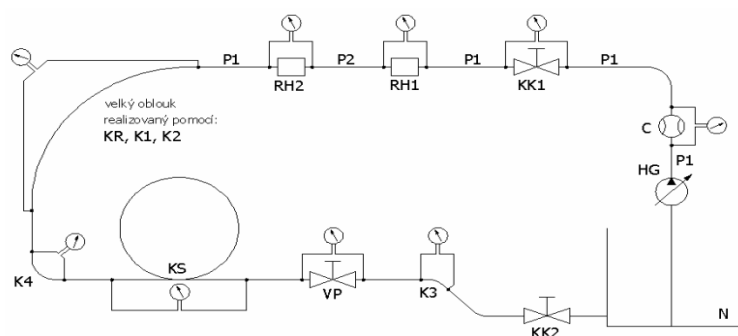


Obr. 4.1 Měřicí obvod [5]

#### Princip funkce

Za pomoci čerpadla nasáváme kapalinu (vodu), kterou vháníme do měřicího obvodu. Tato kapalina prochází celým obvodem přes níže specifikované prvky, na kterých vzniká tlaková difference, kterou zjišťujeme pomocí U-trubic. Kapalina proudí zpět do nádrže.

V obvodu je umístěna clona, na které odečteme výškový rozdíl hladin a za použití cejchovní křivky clony (viz Příloha E) zjistíme hodnotu průtoku v různých polohách přivírání kohoutu. Odečteme výškový rozdíl hladin z příslušné U-trubice a následně vypočteme tlakovou diferenci. Z tlakové difference lze spočítat součinitel místních ztrát.



Obr. 4.2 Schéma obvodu [5]

## Prvky obvodu

Tab. 4.1 Seznam prvků [3]

Nádrž (N)		Hrdlová redukce (RH1, RH2)	
Čerpadlo (HG)		Křížení (KR)	
Clona (C)		Koleno 45° (K1, K2, K3)	
Potrubí (P1)		Koleno 90° (K4)	
Potrubí (P2)		Kompenzační smyčka (KS)	
Kulový kohout (KK1, KK2)		Přímý ventil (VP)	

### ○ Redukce hrdlová - (RH1, RH2) - měřené prvky

Tab. 4.2 Redukce hrdlová [5]

<b>Redukce hrdlová (pro zúžení/rozšíření potrubí) (RH1, RH2)</b>		
Typ:	SRE02520XX	
Vnitřní průměr 1:	18 mm	
Vnitřní průměr 2:	14,4 mm	
Výrobce:	WAVIN Ekoplastik, s.r.o.	

## 4.2 Postup měření pro obvod č. 1.

Před spuštěním čerpadla nejdříve připojíme příslušná odběrná místa (viz Obr. 4.3) na U-trubice a příslušnou vzdálenost od prvku, např. RH1 (viz Obr. 4.3) a na nejbližší odběrná místa v našem případě měření „blízko“.

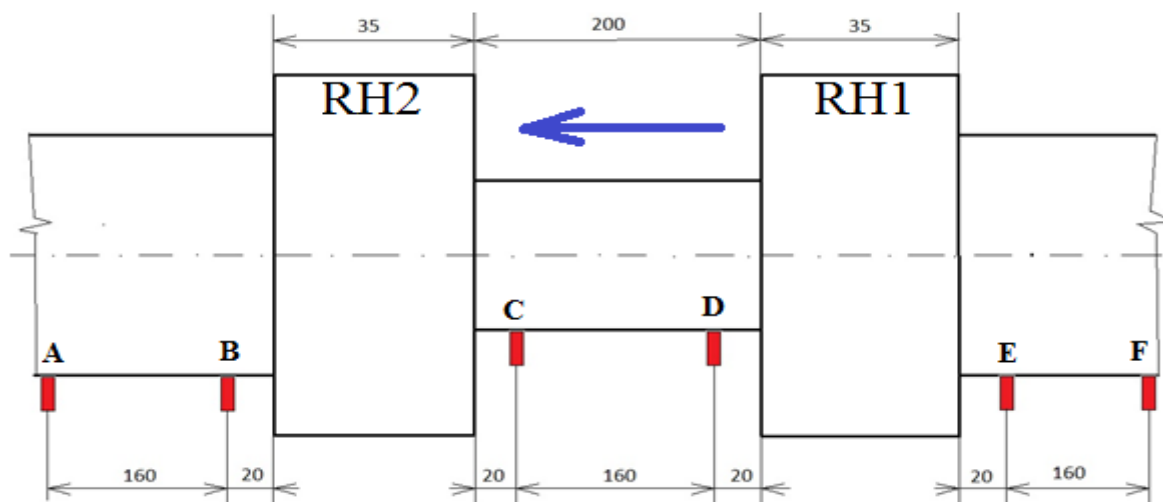
Po připojení U-trubic můžeme spustit čerpadlo, díky kterému nám bude obvodem protékat kapalina (voda), otevřeme oba kulové kohouty. Odečteme rozdíl výšek hladin na U-trubici připojené na cloně a rozdíl výšek hladin na příslušné U-trubici připojené na RH1.

Po odečtení výšek hladin při otevřeném obvodu začneme přivírat KK2 (viz Obr. 4.2), tak abychom dostali 10 měření při různém průtoku kapaliny. Při každé poloze uzavření KK2 odečítáme rozdíly výšek hladin na U-trubicích (clona, RH1) a zapisujeme do tabulky.

Měření opakujeme pro různé vzdálenosti od měřeného prvku (viz Obr. 4.3) a pro druhý prvek (RH2). Výpočet z naměřených hodnot je uveden v kapitole 5.1.

### Vzdálenosti pro měření viz Obr. 4.3

- „blízko“: zúžení – ED, rozšíření – CB
- „daleko“: zúžení – FC, rozšíření - DA



červeně jsou označena odběrná místa

modře směr průtoku

Obr. 4.3 Detail měřené části

### 4.3 Měřicí obvod č. 2

#### Úvod

Z důvodu definování ztrátového součinitele pro vysoká Reynoldsova čísla v použité literatuře jsem se snažil v druhém obvodu dosáhnout větších průtoků.

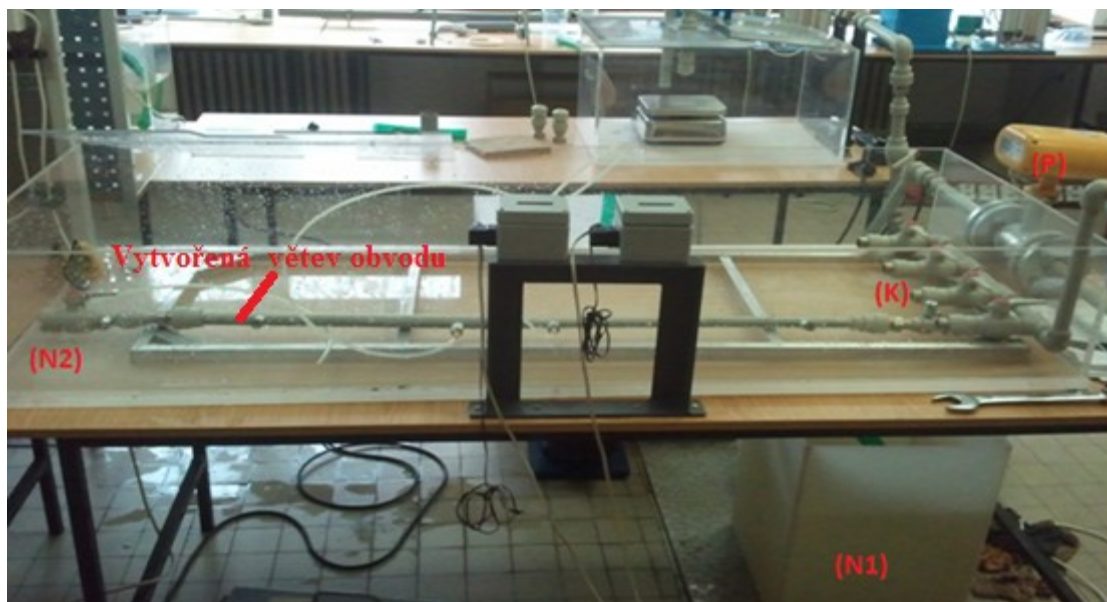
Použil jsem upravený obvod pro měření charakteristiky potrubí, kde bylo dosaženo až dvojnásobných Reynoldsových čísel než v předešlém měření.

V tomto obvodu byla použita odběrná místa, umístěna ve větší vzdálenosti od redukce k eliminaci neustáleného proudění kapaliny v blízkosti měřeného prvku.

#### Princip funkce

Za pomoci čerpadla nasáváme kapalinu (vodu), kterou vháníme do měřicího obvodu. Tato kapalina prochází částí obvodu, ve které otevřeme příslušný kulový kohout. V našem případě pouze přes kulový ventil, na který jsme připojili vytvořenou část obvodu.

Na použité redukci měříme tlakovou diferenci pomocí diferenčních tlakoměrů při různých průtocích. Velikost průtoku ovlivňujeme kulovým kohoutem umístěným na výstupu z obvodu, který postupně přivíráme, čímž snižujeme hodnotu průtoku.



Obr. 4.4 Měřicí obvod

## Prvky obvodu [10]

- **Nádrž (N1)**  
Objem nádrže 80dm<sup>3</sup>  
Výrobce Valter Špalek – plexi
- **Čerpadlo (HG)**  
Výrobce WILO  
Typ TOP-S30/10  
Výkon 390, 385, 335W
- **Indukční průtokoměr (P)**  
Typ FN 2014.1  
Výrobce ELIS PLZEŇ a.s.
- **Kulový kohout (K) – uzavírací prvek**  
Typ SVEK032XXX  
Velikost DN25  
Vnitřní průměr 18mm  
Výrobce WAVIN Ekoplastik, s.r.o.
- **Nádrž (N2)**  
Objem nádrže 200dm<sup>3</sup>  
Výrobce Valter Špalek - plexi
- **Manometr (M)**  
Typ BHV 5355  
Výrobce BHV senzory s.r.o.  
Rozsah 0 – 20kPa  
Přesnost 0,5%  
Statický tlak do 600kPa



Obr. 4.5 Čerpadlo [10]



Obr. 4.6 Indukční průtokoměr [10]



Obr. 4.7 Diferenční manometr [10]

- **Popis manometru**

„Základním prvkem snímače je tlakový senzor typu BHV 53 s kovovou měřicí membránou. Nepatrná výchylka membrány se snímá pomocí indukčnostního snímacího systému se dvěma cívkami v půlmostovém diferenciálním zapojení.“ [11].

- **Potrubí**

Typ STRO20P16X

Vnější průměr: 20 mm

Vnitřní průměr: 14,4 mm

Výrobce WAVIN Ekoplastik, s.r.o.

- **Potrubí**

Typ STRO25P16X

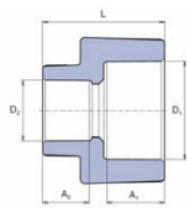

Vnější průměr: 25 mm

Vnitřní průměr: 18 mm

Výrobce WAVIN Ekoplastik, s.r.o.

Tab. 4.3 Redukce hrdlová [5]

Redukce hrdlová (pro zúžení/rozšíření potrubí) (RH1, RH2)	
Typ:	SRE02520XX
Vnitřní průměr 1:	18 mm
Vnitřní průměr 2:	14,4 mm
Výrobce:	WAVIN Ekoplastik, s.r.o.

#### 4.4 Postup měření pro obvod č. 2

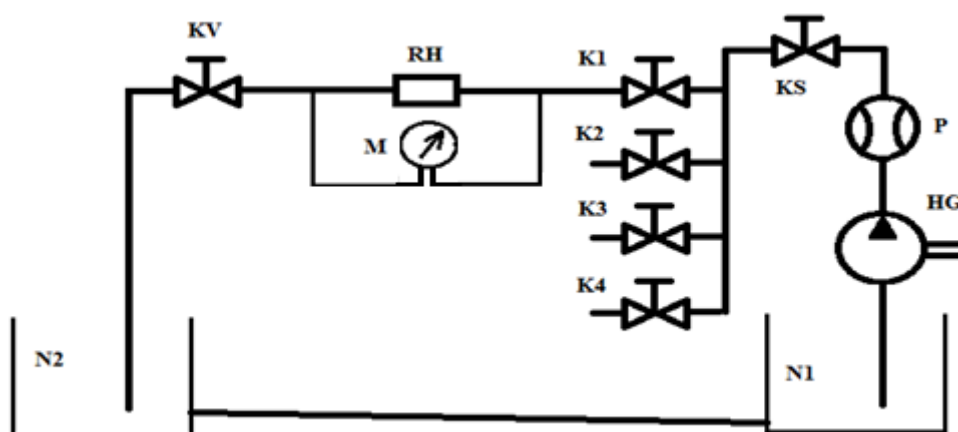
Připojíme příslušná odběrná místa (viz Obr. 4.9) na diferenční manometr. Nejdříve provedeme měření na „blízko“ zúžení, v dalším měření připojíme vzdálenější odběrná místa a provedeme měření „daleko“ (viz Obr. 4.9). Spustíme čerpadlo a otevřeme příslušné kulové kohouty (viz Obr. 4.8).

Odečteme hodnoty průtoku a tlakové difference při plně otevřeném obvodu. Postupně uzavíráme výstupní kulový kohout (KV viz Obr. 4.8), abychom snižovali průtok obvodem. Při každé poloze ventilu odečítáme hodnoty průtoku a tlakové difference, které zapisujeme do tabulky.

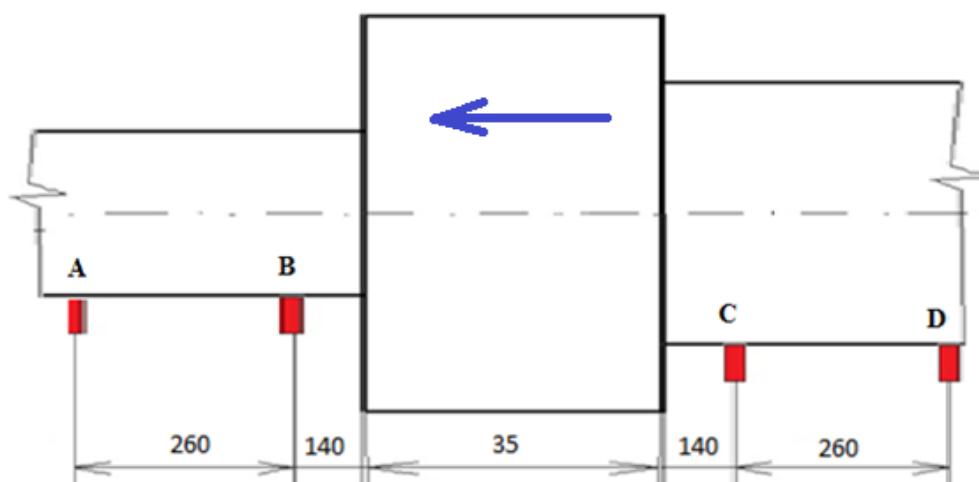
Po změření zúžení v obou vzdálenostech odběrných míst („blízko“, „daleko“) odpojíme námi vytvořenou větev obvodu (viz Obr. 4.4) a otočíme ji, čímž vznikne obvod pro měření rozšíření. A stejným postupem měření opakujeme.

#### Vzdálenosti pro měření viz Obr. 4.9

- „blízko“: zúžení – CB, rozšíření – BC
- „daleko“: zúžení – DA, rozšíření – AD



Obr. 4.8 Schéma 2. obvodu



červeně jsou označena odběrná místa  
modře směr průtoku

Obr. 4.9 Detail měřené části



## 5 Vyhodnocení měření

### 5.1 Příklad výpočtu

Výpočet je totožný pro oba obvody, z toho důvodu uvedu příklad výpočtu pro 2. měřící obvod s odběrnými místy situovanými daleko a pro první řádek tabulky, ve kterém vyšly hodnoty přesněji.

Výpočet se liší různými uvažovanými délkami při výpočtu třecích ztrát, které vychází z detailů měřených úseků a rozdílným průtokem (pro 1. obvod byl vypočten průtok z cejchovní křivky clony, viz příloha E - Obr. 9.1, pro 2. obvod byl odečten z průtokoměru)

*Hodnoty viz příloha C - Tab. 9.6 a Příloha D - Tab. 9.8,*

*viskozita  $\nu = 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  [12]*

#### Zúžení daleko

- **Tlaková difference vzniklá přeměnou kinetické energie**

$$\Delta p_k = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \cdot \rho = \frac{1,63^2 - 2,55^2}{2} \cdot 1\,000 = -1\,921 \text{ Pa}$$

**Kde:**

$v_1$  je rychlost v potrubí o světlosti  $d_1$

$$v_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{\left(\frac{1,495}{3600}\right)}{\frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}} = 2,55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$v_2$  je rychlost v potrubí o světlosti  $d_2$

$$v_2 = \frac{v_1 \cdot S_1}{S_2} = \frac{2,55 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}} = 1,63 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Třecí ztráta**

$$\Delta p_{\text{tr}} = \Delta p_{\text{tr}1} + \Delta p_{\text{tr}2} = 2\,071,33 + 717,67 = 2\,789 \text{ Pa}$$

**Kde:**

$\Delta p_{tř1}$  je třecí ztráta v potrubí o světlosti  $d_1$

$$Re = \frac{v_1 \cdot d_1}{\nu} = \frac{2,55 \cdot 0,0144}{0,000001} = 36\,356$$

$$\lambda_1 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{36356}} = 0,0242$$

$$\Delta p_{tř1} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho = 0,0242 \cdot \frac{0,4}{0,0144} \cdot \frac{2,55^2}{2} \cdot 1\,000 = 2\,071 \text{ Pa}$$

$\Delta p_{tř2}$  je třecí ztráta v potrubí s větší světlostí, postup výpočtu je shodný s  $\Delta p_{tř1}$

- **Skutečná místní ztráta**

$$\Delta p_m = \Delta p_{měř} + \Delta p_k - \Delta p_{tř} = 5\,442 - 1\,921 - 2\,789 = 732 \text{ Pa}$$

### Rozšíření daleko

- **Tlaková difference vzniklá přeměnou kinetické energie**

$$\Delta p_k = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \cdot \rho = \frac{2,53^2 - 1,62^2}{2} \cdot 1\,000 = 1\,893 \text{ Pa}$$

**Kde:**

$v_1$  je rychlost v potrubí o světlosti  $d_1$

$$v_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{\left(\frac{1,484}{3600}\right)}{\frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}} = 2,53 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$v_2$  je rychlost v potrubí o světlosti  $d_2$

$$v_2 = \frac{v_1 \cdot S_1}{S_2} = \frac{2,53 \cdot \frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}} = 1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- **Třecí ztráta**

$$\Delta p_{tř} = \Delta p_{tř1} + \Delta p_{tř2} = 708,5 + 2\,044,5 = 2\,753 \text{ Pa}$$

**Kde:**

$\Delta p_{tř1}$  je třecí ztráta v potrubí o světlosti  $d_1$

$$Re = \frac{v_1 \cdot d_1}{\nu} = \frac{2,53 \cdot 0,0144}{0,000001} = 36\,088$$

$$\lambda_1 = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{36\,088}} = 0,0242$$

$$\Delta p_{tř1} = \lambda_1 \cdot \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho = 0,0242 \cdot \frac{0,4}{0,0144} \cdot \frac{2,53^2}{2} \cdot 1000 = 2\,044,5 \text{ Pa}$$

$\Delta p_{tř2}$  je třecí ztráta v potrubí o světlosti  $d_2$ , postup výpočtu je shodný s  $\Delta p_{tř1}$

- **Skutečná místní ztráta**

$$\Delta p_m = \Delta p_{měř} + \Delta p_k - \Delta p_{tř} = 1\,525 + 1\,893 - 2\,753 = 665 \text{ Pa}$$

## 5.2 Vyhodnocení měření 1. Obvodu

### Postup vyhodnocení obecně

Pro vyhodnocení výsledků použijeme graf závislosti „ $\Delta p - v^2$ “. V tomto grafu proložíme naměřenými hodnotami lineární regresní funkci.

### Ze znalosti definice tlakové ztráty a rovnice regresní funkce

- Rovnice regresní funkce

$$y = K \cdot x \tag{5.1}$$

- Definice místní ztráty

$$\Delta p_m = \xi \cdot \frac{v_1^2}{2} \cdot \rho \tag{5.2}$$

Lze vyjádřit koeficient „ $K$ “ jako:

$$K = \frac{\xi \cdot \rho}{2} \tag{5.3}$$

Po dosazení měřených hodnot dostaneme:

$$\Delta p_m = K \cdot v_1^2 \quad (5.4)$$

**Kde:**

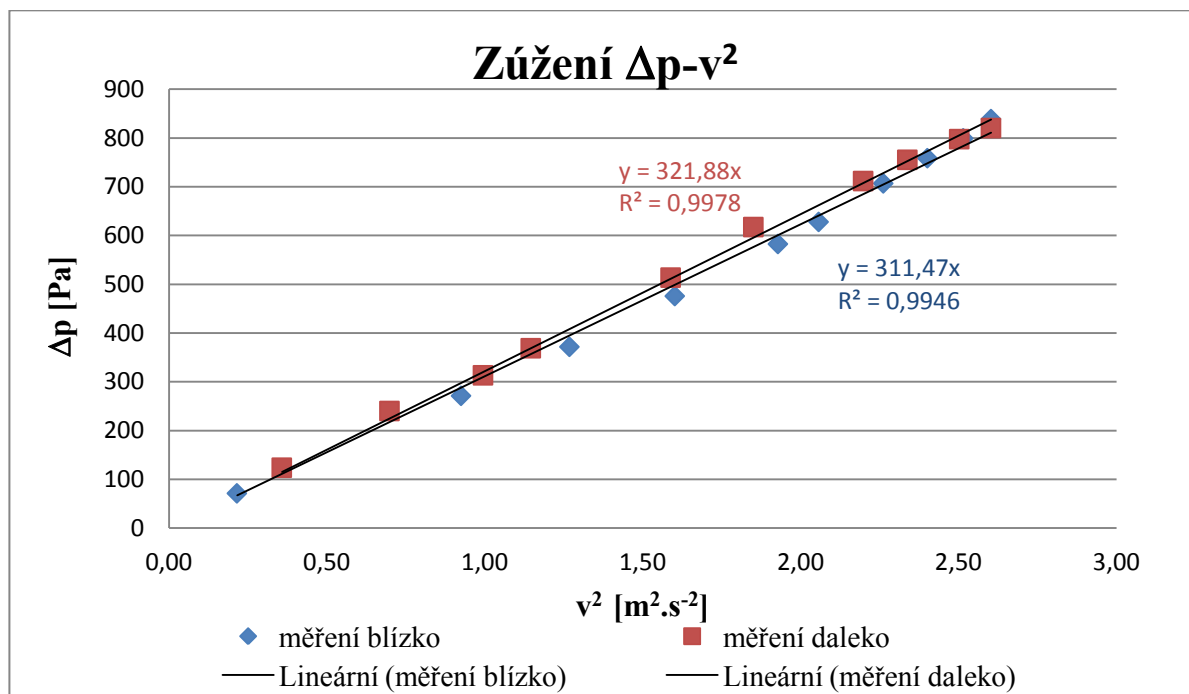
$v_1$  je rychlost v menším potrubí [m.s<sup>-1</sup>]

Při znalosti koeficientu „K“, který odečteme z rovnice regresní funkce. Můžeme dosti snadno odvodit přibližnou hodnotu ztrátového součinitele:

$$\xi = \frac{2 \cdot K}{\rho} \quad (5.5)$$

## Výpočet součinitele pro zúžení

Pro zúžení je ztrátový součinitel definován pro výstupní rychlost, tedy pro rychlost v potrubí o světlosti  $d_1$ .



Obr. 5.1 Grafické vyhodnocení zúžení 1. obvodu

### ○ Měření na blízko

$$\xi_{z1b} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 311,47}{1\,000} = 0,623$$

### ○ Měření daleko

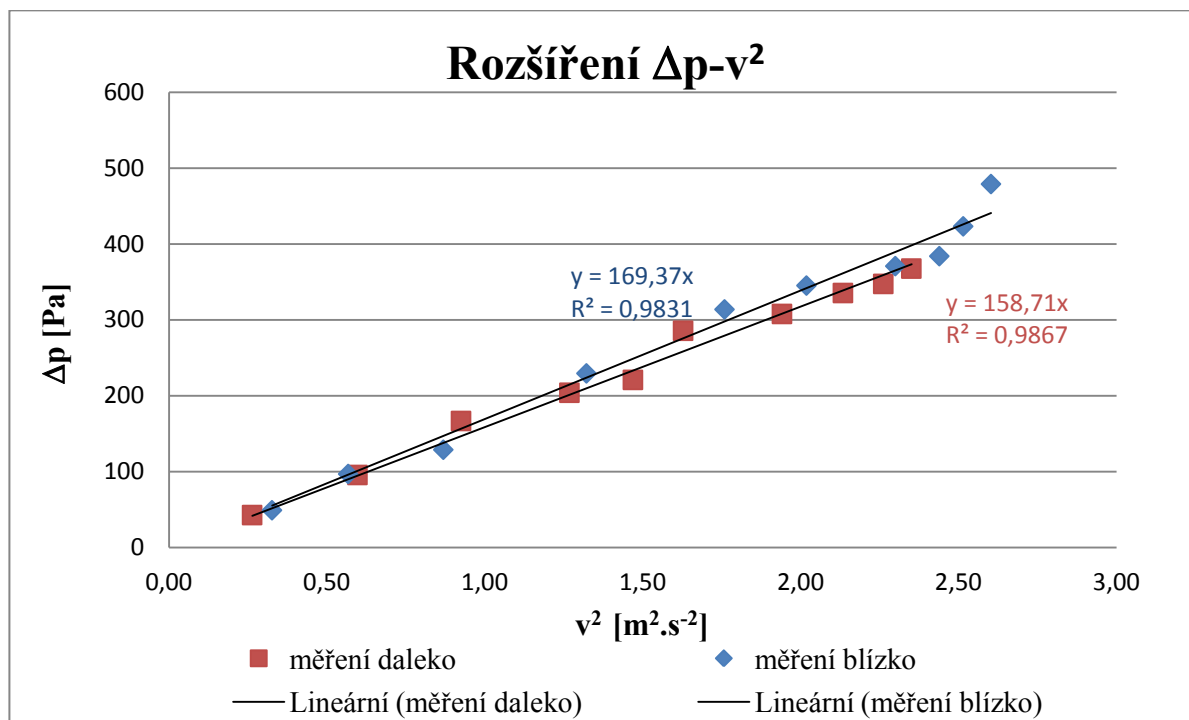
$$\xi_{z1d} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 321,88}{1\,000} = 0,644$$

### ○ Aritmetický průměr z obou měření

$$\xi_{z1} = \frac{\xi_{z1b} + \xi_{z1d}}{2} = \frac{0,623 + 0,644}{2} = 0,634$$

## Výpočet součinitele pro rozšíření

Pro rozšíření je ztrátový součinitel definován pro vstupní rychlost, tedy pro rychlost v potrubí o světlosti  $d_1$ .



Obr. 5.2 Grafické vyhodnocení rozšíření 1. obvodu

### ○ Měření na blízko

$$\xi_{r1b} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 169,37}{1\,000} = 0,339$$

### ○ Měření daleko

$$\xi_{r1d} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 158,71}{1\,000} = 0,317$$

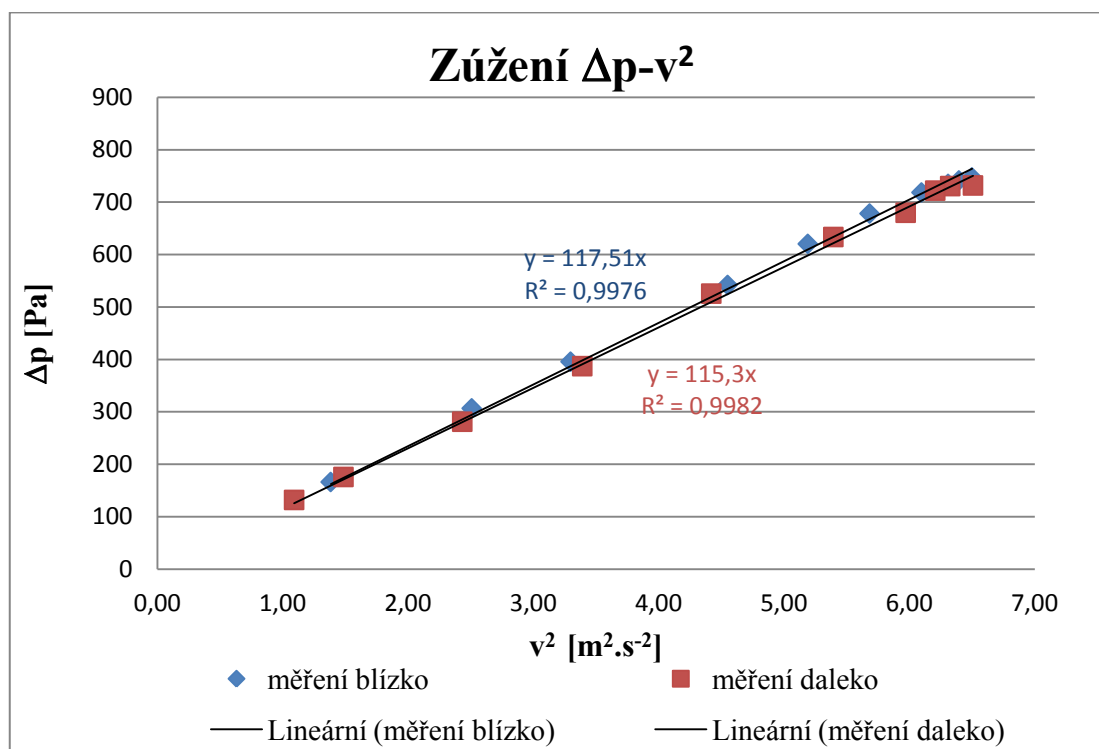
### ○ Aritmetický průměr z obou měření

$$\xi_{r1} = \frac{\xi_{r1b} + \xi_{r1d}}{2} = \frac{0,339 + 0,317}{2} = 0,328$$

### 5.3 Vyhodnocení měření 2. Obvodu

#### Výpočet součinitele pro zúžení

Pro zúžení je ztrátový součinitel definován pro výstupní rychlost, tedy pro rychlost v potrubí o světlosti  $d_1$ .



Obr. 5.3 Grafické vyhodnocení zúžení 2. obvodu

- **Měření na blízko**

$$\xi_{z2b} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 117,51}{1000} = 0,235$$

- **Měření daleko**

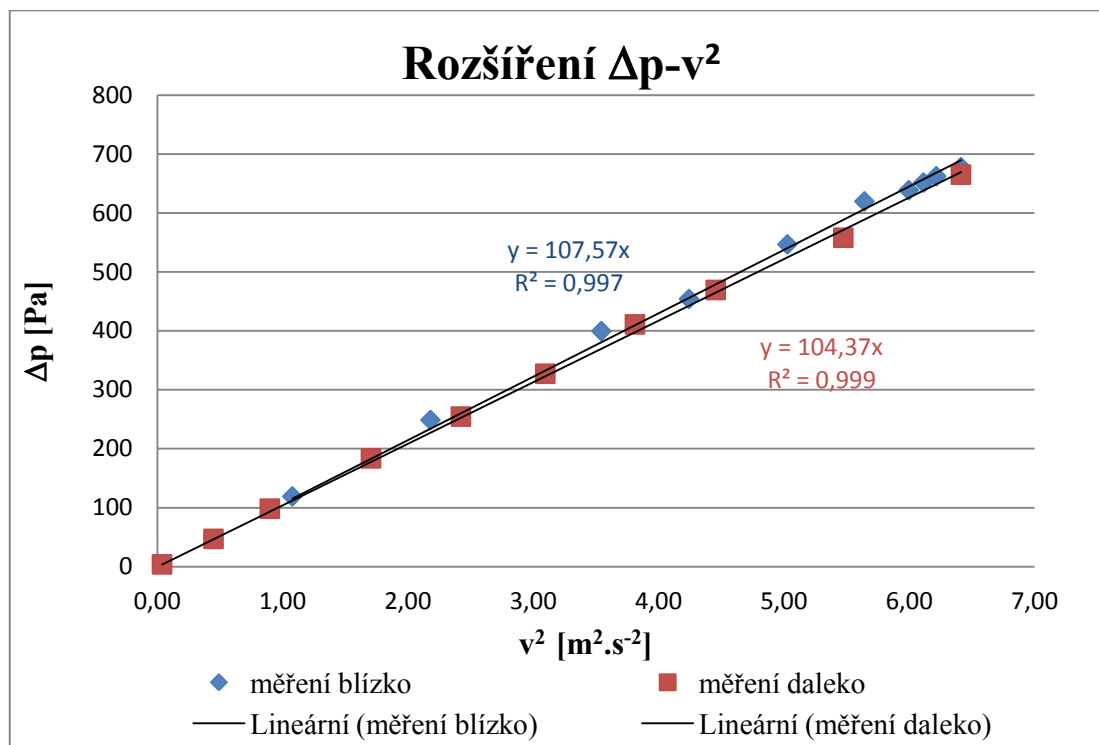
$$\xi_{z2d} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 115,3}{1000} = 0,230$$

- **Aritmetický průměr z obou měření:**

$$\xi_{z2} = \frac{\xi_{z2d} + \xi_{z2b}}{2} = \frac{0,235 + 0,230}{2} = 0,233$$

## Výpočet součinitele pro rozšíření

Pro rozšíření je ztrátový součinitel definován pro vstupní rychlost, tedy pro rychlost v potrubí o světlosti  $d_1$ .



Obr. 5.4 Grafické vyhodnocení rozšíření 2. obvodu

### ○ Měření na blízko

$$\xi_{r2b} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 107,57}{1000} = 0,215$$

### ○ Měření daleko

$$\xi_{r2d} = \frac{2 \cdot K}{\rho} = \frac{2 \cdot 104,37}{1000} = 0,209$$

### ○ Aritmetický průměr z obou měření:

$$\xi_{r1} = \frac{\xi_{r2d} + \xi_{r2b}}{2} = \frac{0,215 + 0,209}{2} = 0,212$$



## **6 Srovnání výsledků měření**

### **6.1 Srovnání výsledků obvodů**

V 1. obvodu jsme měli oba prvky umístěny v blízkosti, prováděné měření bylo realizováno při Reynoldsových číslech od 6 000 do 23 000. Toto měření nebylo zcela ideální. V literatuře [7] je uvedena poznámka, že při nízkých Reynoldsových číslech je ztrátový součinitel proměnný. Konstantních hodnot nabývá při vyšších Reynoldsových číslech.

Tento fakt lze vyčíst z prováděných měření, kde v prvním měření součinitel vykazoval větší odchylky.

V druhém obvodu bylo měření prováděno při Reynoldsových číslech od 14 000 do 38 000. Toto měření již poukazovalo na skutečnost, že při vyšších Reynoldsových číslech dochází k ustálení hodnoty ztrátového součinitele.

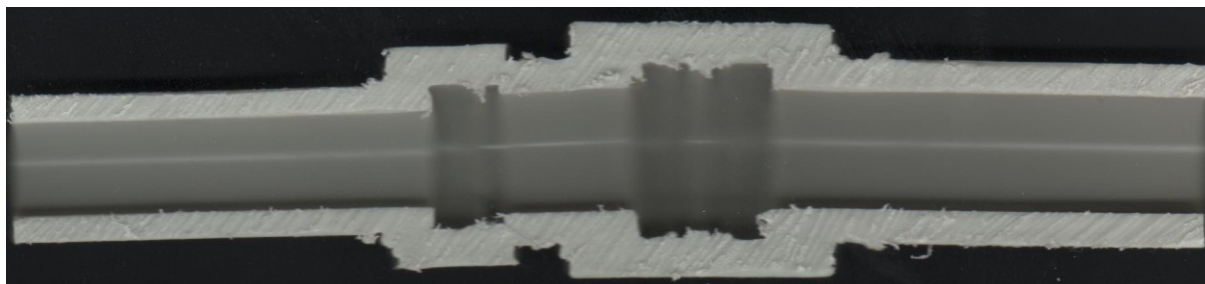
### **6.2 Ovlivnění výsledků**

Pro mou práci a porovnání výsledků jsem vytvořil několik zkušebních spojů redukcí plastového potrubí. Závěr byl překvapující z důvodu, že použitím těchto prvků nikdy nelze vytvořit dokonalá spojení, které je uvedeno v literatuře a je pro něj definován ztrátový součinitel.

Pokusil jsem se vytvořit 3 základní typy spojení. Spoj vzniklý malým natavením materiálu a nedostatečnou silou spojení, ideální spojení a spojení dlouhým ohříváním materiálu a velkou spojovací silou. Takto vzniklé 3 typy spojení jsem rozřízl a vytvořil „scan“ tohoto řezu.

## Výsledky zkušebních spojů:

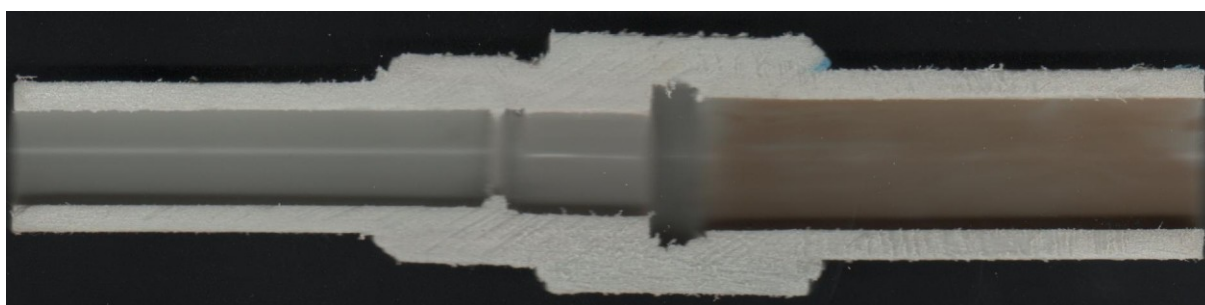
- **Nedostatečné natavení, malá síla při spojování**



Obr. 6.1 Nedostatečný spoj

Při tomto způsobu vznikají mezery, ve kterých může docházet k zavírání proudu kapaliny a rozptylu energie (viz Obr. 6.1). Spoj je hodně odlišný od dokonalého spoje, pro který se uvádí ztrátový součinitel.

- **„Ideální“ spojení**

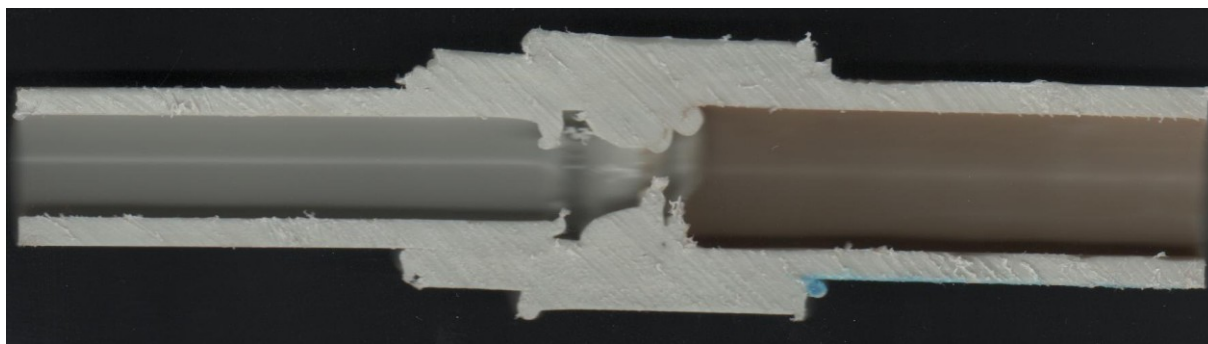


Obr. 6.2 „Ideální“ spoj

Zde lze vidět, že dokonalého spojení nelze dosáhnout. Již v konstrukci redukce je vytvořen rozdělovací kroužek menšího průměru, než je potrubí a tímto vzniká mezera, v které může dojít k zavírání (viz Obr. 6.2).

Dalším důvodem nedokonalého spojení je vznik minimálního prstence v přechodu potrubí na redukci. Tento prstenec může vykazovat určitou excentricitu, tímto může vzniknout ovlivnění proudění kapaliny.

- **Přílišné natavení, velké síly spojení**



Obr. 6.3 Přetavený spoj

Spojením za těchto podmínek dochází téměř k neprůchodnosti potrubí, vzniká zde značné škrcení průtoku. V tomto extrémním případě dochází k velkým tlakovým ztrátám.

Vznikají různé prstence, které ovlivňují proudění kapaliny (viz Obr. 6.3). Dochází zde k značnému zavírání proudu.

### 6.3 Srovnání výsledků dle Simulink-Simhydraulics

Výsledkem tohoto měření by mohlo být právě stanovení tohoto opravného součinitele uvedeného v této literatuře [9], ale cílem této práce je naopak srovnání naměřených hodnot s hodnotami ideálními uvedenými v literatuře.

#### Dosazení do uvedených vztahů

- **Rozšíření**

$$K_{SE} = K_{COR} \cdot \left(1 - \frac{A_S}{A_L}\right)^2 = 1 \cdot \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}}\right)^2 = 0,130$$

- **Zúžení**

$$K_{SC} = K_{COR} \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{A_S}{A_L}\right)^{0,75} = 1 \cdot 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}}\right)^{0,75} = 0,234$$

## Výsledky naměřené

- **rozšíření**

$$\xi_{r1} = 0,328$$

$$\xi_{r2} = 0,212$$

- **zúžení**

$$\xi_{z1} = 0,634$$

$$\xi_{z2} = 0,233$$

Z uvedených výsledků vidíme, že ve srovnání s programem Simulink-Simhydraulic přesně vyšla pouze hodnota pro zúžení v 2. obvodě, který pracoval při vyšších Reynoldsových číslech a součinitel pro rozšíření se této hodnotě blíží. Zbylé hodnoty vyšly s větší nepřesností.

## 6.4 Srovnání výsledků dle literatury Mechanika tekutin

- **Rozšíření**

$$\xi_1 = \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

- **Zúžení**

$$\xi_1 = 1 - \frac{S_2}{S_1}$$

### Dosazení do uvedených vztahů [7]

- **Rozšíření**

$$\xi_R = \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{0,0144}{0,018}\right)^2\right]^2 = 0,130$$

- **Zúžení**

$$\xi_Z = 1 - \frac{S_2}{S_1} = 1 - \frac{\frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}} = 0,360$$

## Výsledky naměřené

### ○ rozšíření

$$\xi_{r1} = 0,328$$

$$\xi_{r2} = 0,212$$

### ○ zúžení

$$\xi_{z1} = 0,634$$

$$\xi_{z2} = 0,233$$

Jak lze vidět výsledky skutečné v porovnání s teoretickými jsou značně odlišné. Měření v 2. obvodu se pro rozšíření teoretické hodnotě blíží, naopak pro zúžení dokonce vyšel ztrátový součinitel nižší než teoretický.

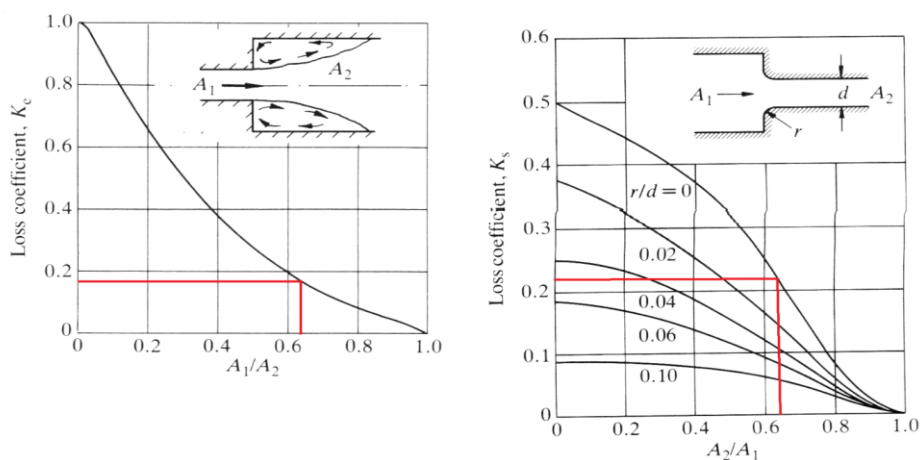
Měření z 1. obvodu se ztrátový součinitel této teoretické hodnotě vzdáleně blíží, ale v obou případech je značně vyšší.

## 6.5 Srovnání výsledků dle literatury Internal flow systems

### Poměr průřezů

*Pro grafické vyhodnocení je nutno spočítat poměr průřezů. Konkrétně průřezu menšího k většímu.*

$$X = \frac{S_1}{S_2} = \frac{\frac{\pi \cdot 0,0144^2}{4}}{\frac{\pi \cdot 0,018^2}{4}} = 0,64$$



Obr. 6.4 Grafické vyhodnocení [8]

## Odečtené hodnoty z grafu [8]

$$\xi_R = 0,19$$

$$\xi_Z = 0,22$$

## Výsledky naměřené

### ○ rozšíření

$$\xi_{r1} = 0,328$$

$$\xi_{r2} = 0,212$$

### ○ zúžení

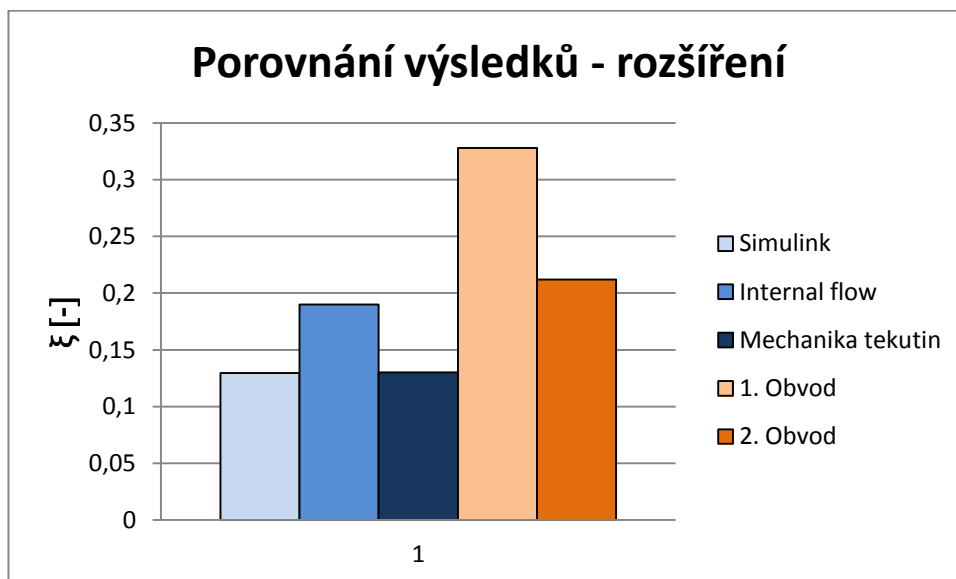
$$\xi_{z1} = 0,634$$

$$\xi_{z2} = 0,233$$

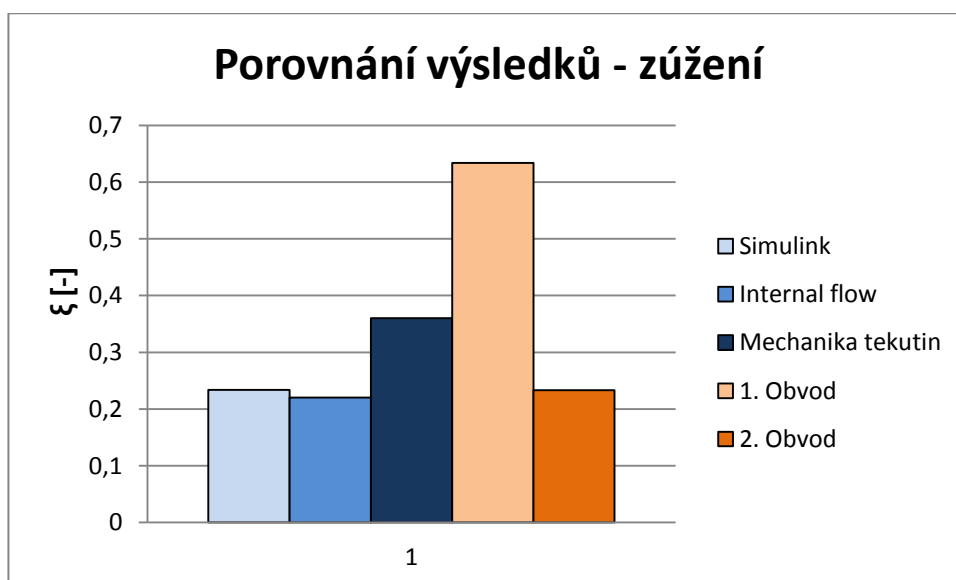
Hodnoty z 2. obvodu vyšly značně blízko hodnotám teoretickým i při skutečnosti, že měření probíhalo při Reynoldsových číslech do 38 000. Rozdíl je pouze par desetin.

Měření z 1. obvodu vyšlo opět značně nepřesně.

## 6.6 Grafické vyhodnocení



Obr. 6.5 Grafické porovnání výsledků rozšíření



Obr. 6.6 Grafické porovnání výsledků zúžení

## 7 Závěr

V této práci jsem vypracoval postup vyhodnocení ztrátového součinitele pro redukci s uvažováním třecích ztrát a změny kinetické energie.

Ve srovnání s uvedenou literaturou jsem dospěl k závěru, že pro tuto redukci nelze použít ztrátový součinitel teoretický, z důvodu uvedení ztrátového součinitele v literatuře pro ideální tvar redukce s ostrými hranami a bez vzniklé mezery.

Použitím plastové redukce ideálního spojení nelze dosáhnout. Při spojení plastových prvků dochází ke vzniku zúžení přetečením materiálu nebo naopak nedostatečným spojením a následným vznikem mezery.

Dalším faktorem ovlivňujícím výsledné hodnoty je Reynoldsovo číslo. Hodnoty ztrátových součinitelů jsou uvedeny v literatuře pro vysoká Reynoldsova čísla.

Nezanedbatelným faktorem je i možnost ovlivnění výsledků zavířením, ke kterému mohlo docházet v 1. obvodu. Při odběrných místech umístěných v blízkosti dalšího tvarového prvku.

Přesto při srovnání výsledků naměřených součinitelů a teoretických hodnot nedochází ke značnému rozdílu mezi těmito hodnotami, dle očekávání vyšlo přesněji měření pomocí 2. obvodu, kde jsem dosáhl vyšších Reynoldsových čísel. První obvod vyšel s vyššími odchylkami.

Důvod nepřesnosti nelze určit definitivně, musel bych z použitého obvodu odstranit použité redukce a vytvořit řez těmito redukcemi, což nelze z důvodu použití obvodu pro školní potřeby. Výsledek pravděpodobně je ovlivněn nízkými Reynoldsovými čísly, popřípadě deformací spoje (viz kapitola 6.2).

Přílohy jsou umístěny za hlavní textovou částí, kde jsou uvedeny tabulky naměřených, vypočtených hodnot a cejchovní křivka clony použité v 1. obvodu.

Cílem této práce bylo porovnání výsledných hodnot ztrátových součinitelů, což jsem provedl početně i graficky.

Na závěr této práce bych chtěl podotknout, že ztrátový součinitel pro plastovou redukci není ideálně definován. Tento fakt bychom mohli zlepšit stanovením korekčního součinitele, který by opravoval hodnotu ztrátového součinitele pro ideální redukci.



## Použitá literatura

- [1] BOJKO, Marian; KOZUBKOVÁ, Milada; RAUTOVÁ, Jana . *Základy hydromechaniky a zásobování hasivý : učební text*. Ostrava, 2007. 182 s. ISBN 80-86634-53-1.
- [2] INAMDAR, Shreeram. *Minor losses in pipes: Losses caused by fittings, bends, valves, etc.* In: [online]. [cit. 2012-01-22]. Dostupné z: [http://udel.edu/~inamdar/EGTE215/Minor\\_loss.pdf](http://udel.edu/~inamdar/EGTE215/Minor_loss.pdf)
- [3] KRČ, Petr. *Měření místních ztrát: kompenzační smyčka, změna průřezu*. Ostrava, 2009. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jana Rautová, Ph.D.
- [4] JANALÍK, Jaroslav. *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje*. Ostrava, 2008. In: [online]. [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: [http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-HYDRODYNAMIKA\\_A\\_HYDRODYNAMICKÉ\\_STROJE.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-HYDRODYNAMIKA_A_HYDRODYNAMICKÉ_STROJE.pdf)
- [5] KOZUBKOVÁ, Milada. *Mechanika tekutin: návody pro laboratorní měření*. Ostrava: 2007. In: [online]. [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/navod.pdf>
- [6] JANALÍK, Jaroslav. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava, 1995. In: [online]. [cit. 2012-01-23]. Dostupné z: [http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni\\_tek\\_mech.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_tek_mech.pdf)
- [7] NOSKIEVIČ, Jaromír ; a kolektiv. *Mechanika tekutin*. Praha, 1987. 354 s.
- [8] MILLER, M., S. *Internal Flow System* ; BHRA UK, 396 s., ISBN 0-947711-77-5
- [9] THE MathWorks. *SimHydraulics: For Use with Simulink*, Natick, 2006.
- [10] RAUTOVÁ, Jana. *Měření charakteristik paralelně a sériově řazených potrubí*, VŠB-TU Ostrava, 2010. In: [online]. [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: [http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni\\_charakteristik.pdf](http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_charakteristik.pdf)
- [11] BHV senzory s.r.o. *DIFERENČNÍ TLAKOVÉ SNÍMAČE BHV 5355*, Kněževes u Prahy, 2010. In: [online]. [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: [http://www.bhvsenzory.cz/data/products/file/bhv\\_5355.pdf](http://www.bhvsenzory.cz/data/products/file/bhv_5355.pdf)
- [12] MIKULČÁK, Jiří; KLIMEŠ, Bohdan; ŠIROKÝ, Jaromír; ŠULA, Václav; ZEMÁNEK, František. *MATEMATICKÉ, FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ TABULKY: pro střední školy*. Praha, 1989. 206 s.

## Seznam příloh

*přílohy jsou umístěny za hlavní textovou částí ve společné vazbě a ve zvláštní příloze (CD)*

**Příloha A** – Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro obvod 1. zúžení „blízko“, „daleko“

**Příloha B** – Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro obvod 1. rozšíření „blízko“, „daleko“

**Příloha C** – Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro obvod 2. zúžení „blízko“, „daleko“

**Příloha D** – Tabulky naměřených a vypočtených hodnot pro obvod 2. rozšíření „blízko“, „daleko“

**Příloha E** – Cejchovní křivka clony použita v 1. obvodu

**Zvláštní příloha** – CD obsahující text bakalářské práce, přílohy a fotografie umístěno v zadním přیدهšti

**Tímto bych chtěl poděkovat prof. RNDr. Miladě Kozubkové, CSc. za laskavou pomoc, cenné připomínky, podněty a rady při tvorbě této bakalářské práce.**

## **Příloha A: Tabulky pro 1. obvod zúžení**

### **○ Zúžení, blízko**

Tab. 9.1 Zúžení „blízko“ 1. obvod

č. měření	$\Delta h_{\text{měř}}$ [mm]	$\Delta h_c$ [mm]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	175	188	839	0,946	1,61	2,60	22993	0,644
2	168	181	799	0,929	1,59	2,52	22601	0,636
3	160	172	759	0,908	1,55	2,40	22085	0,632
4	150	161	707	0,881	1,50	2,26	21433	0,625
5	135	145	628	0,841	1,43	2,06	20441	0,610
6	126	135	583	0,814	1,39	1,93	19790	0,604
7	104	110	476	0,742	1,27	1,60	18036	0,594
8	82	85	372	0,660	1,13	1,27	16048	0,586
9	60	60	271	0,564	0,96	0,93	13706	0,587
10	15	12	71	0,272	0,46	0,22	6611	0,662

### **○ Zúžení, daleko**

Tab. 9.2 Zúžení „daleko“ 1. obvod

č. měření	$\Delta h_{\text{měř}}$ [mm]	$\Delta h_c$ [mm]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	211	188	820	0,946	1,61	2,60	22993	0,630
2	204	180	798	0,927	1,58	2,50	22544	0,637
3	192	167	755	0,896	1,53	2,34	21792	0,646
4	181	156	712	0,869	1,48	2,20	21129	0,647
5	155	129	617	0,797	1,36	1,85	19386	0,667
6	132	109	514	0,739	1,26	1,59	17962	0,647
7	96	76	369	0,627	1,07	1,15	15255	0,644
8	83	65	313	0,584	1,00	0,99	14212	0,630
9	61	44	240	0,490	0,84	0,70	11909	0,688
10	32	21	124	0,350	0,60	0,36	8518	0,693

## **Příloha B: Tabulky pro 1. obvod rozšíření**

### **○ Rozšíření, blízko**

Tab. 9.3 Rozšíření „blízko“ 1. obvod

č. měření	$\Delta h_{\text{měř}}$ [mm]	$\Delta h_c$ [mm]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	166	188	969	0,946	1,61	2,60	22993	0,745
2	168	181	1012	0,929	1,59	2,52	22601	0,804
3	159	175	943	0,915	1,56	2,44	22258	0,773
4	147	164	861	0,889	1,52	2,30	21613	0,749
5	134	142	806	0,833	1,42	2,02	20248	0,799
6	125	122	785	0,777	1,33	1,76	18902	0,892
7	103	89	681	0,674	1,15	1,32	16386	1,030
8	82	56	590	0,546	0,93	0,87	13284	1,358
9	60	35	450	0,442	0,75	0,57	10736	1,585
10	16	19	78	0,335	0,57	0,33	8141	0,481

### **○ Rozšíření, daleko**

Tab. 9.4 Rozšíření „daleko“ 1. obvod

č. měření	$\Delta h_{\text{měř}}$ [mm]	$\Delta h_c$ [mm]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	86	168	368	0,899	1,53	2,35	21851	0,313
2	82	161	347	0,881	1,50	2,26	21433	0,307
3	78	151	335	0,856	1,46	2,13	20820	0,314
4	71	136	308	0,817	1,39	1,94	19856	0,317
5	62	112	286	0,748	1,28	1,63	18184	0,351
6	52	100	221	0,710	1,21	1,47	17274	0,300
7	46	85	204	0,660	1,13	1,27	16048	0,321
8	35	60	167	0,564	0,96	0,93	13706	0,360
9	21	37	95	0,453	0,77	0,60	11010	0,320
10	9	15	43	0,301	0,51	0,26	7314	0,324

## **Příloha C: Tabulky pro 2. obvod zúžení**

### **○ Zúžení, blízko**

Tab. 9.5 Zúžení „blízko“ 2. obvod

č. měření	$\Delta p_{\text{měř}}$ [Pa]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	3704	747	1,494	2,55	6,50	37238	0,230
2	3653	741	1,482	2,53	6,40	36939	0,232
3	3609	735	1,472	2,51	6,31	36689	0,233
4	3500	718	1,447	2,47	6,10	36066	0,236
5	3279	678	1,397	2,38	5,68	34820	0,239
6	3005	620	1,335	2,28	5,19	33275	0,239
7	2645	542	1,250	2,13	4,55	31156	0,238
8	1942	396	1,064	1,82	3,30	26520	0,240
9	1498	306	0,928	1,58	2,51	23130	0,244
10	842	166	0,689	1,18	1,38	17173	0,240

### **○ Zúžení, daleko**

Tab. 9.6 Zúžení „daleko“ obvod 2.

č. měření	$\Delta p_{\text{měř}}$ [Pa]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	5442	732	1,495	2,55	6,51	36356	0,225
2	5319	730	1,474	2,52	6,33	35845	0,231
3	5230	722	1,460	2,49	6,21	35504	0,233
4	5029	680	1,432	2,44	5,97	34823	0,228
5	4592	633	1,361	2,32	5,39	33097	0,235
6	3818	525	1,232	2,10	4,42	29960	0,238
7	2964	387	1,079	1,84	3,39	26239	0,228
8	2178	281	0,914	1,56	2,43	22227	0,231
9	1379	176	0,714	1,22	1,48	17363	0,236
10	1038	132	0,612	1,04	1,09	14883	0,242

## **Příloha D: Tabulky pro 2. obvod rozšíření**

### ○ Rozšíření, blízko

Tab. 9.7 Rozšíření „blízko“ 2. obvod

č. měření	$\Delta p_{\text{měř}}$ [Pa]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	-183	678	1,484	2,53	6,41	36088	0,211
2	-168	662	1,461	2,49	6,22	35529	0,213
3	-163	652	1,449	2,47	6,11	35237	0,213
4	-158	639	1,435	2,45	6,00	34896	0,213
5	-123	620	1,392	2,38	5,64	33851	0,220
6	-103	547	1,314	2,24	5,03	31954	0,218
7	-79	454	1,207	2,06	4,24	29352	0,214
8	-32	400	1,103	1,88	3,54	26823	0,226
9	7	249	0,865	1,48	2,18	21035	0,228
10	18	119	0,608	1,04	1,08	14785	0,221

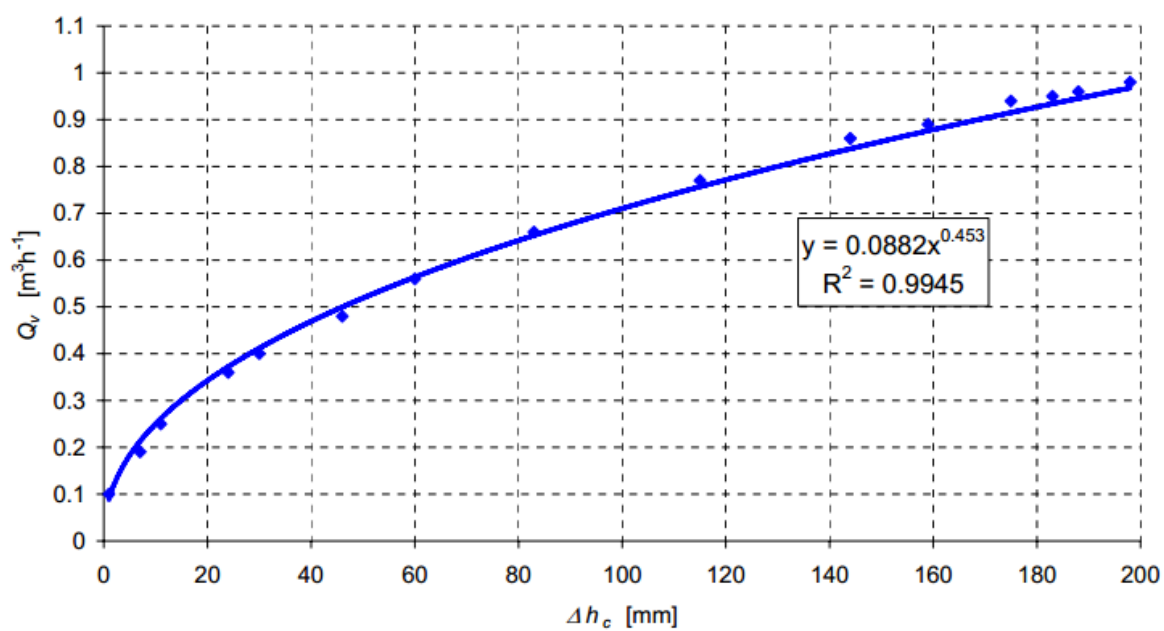
### ○ Rozšíření, daleko

Tab. 9.8 Rozšíření „daleko“ obvod 2.

č. měření	$\Delta p_{\text{měř}}$ [Pa]	$\Delta p_m$ [Pa]	$Q_v$ [m <sup>3</sup> ·hod <sup>-1</sup> ]	$v$ [m·s <sup>-1</sup> ]	$v^2$ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ]	Re [-]	$\zeta$ [-]
1	1525	665	1,484	2,53	6,41	36088	0,207
2	1339	558	1,371	2,34	5,47	33340	0,204
3	1156	469	1,237	2,11	4,46	30081	0,211
4	1032	411	1,144	1,95	3,81	27820	0,216
5	869	327	1,031	1,76	3,10	25072	0,211
6	714	255	0,912	1,56	2,42	22178	0,210
7	544	184	0,765	1,31	1,70	18603	0,216
8	326	98	0,555	0,95	0,90	13497	0,219
9	183	47	0,392	0,67	0,45	9533	0,211
10	23	4	0,112	0,19	0,04	2724	0,212

## Příloha E: Cejchovní křivka clony

Cejchovní křivka clony použita pro výpočet průtoku



Obr. 9.1 Cejchovní křivka clony [5]